

発信点と受信点を結ぶ電磁波の伝搬経路の探索法

塩田 茂雄

キーワード：無線 LAN, 経路探索, レイトレーシング, 鏡像法, 計算量

本稿は、日下 美穂さんが千葉大学大学院工学研究科に提出した 2012 年度修士論文、および同氏と共著で発表した論文 [1] をもとに加筆修正したものです。

1. はじめに

屋内空間では、無線 LAN のアクセスポイントを発した電磁波は、壁や家具などで反射しながらさまざまな経路を通して無線端末（タブレット端末、スマートフォンなど）に到達します。経路が異なると、到達する時刻も変わるため、アクセスポイントからの電磁波がこだまのように時間差を持って次々と無線端末に届きます。このこだま現象は無線通信の品質に影響するため、電磁波が光のように直進すると仮定したうえで、発信点から受信点に至るさまざまな経路を幾何学的に求めて、無線通信を行う際に起こりえそうなことを事前に調査することがしばしば行われます。この手法はレイトレーシングと呼ばれています。

受信点に至る経路を探索する手法の一つに鏡像法があります。電磁波の反射面となりうる（通常は複数の）壁面を選びその反射順序を決めると、電磁波の仮想的な発信点（鏡像点）が定まります。鏡像法は、壁面の各順列に対して定まる鏡像点から受信点に至る経路をトレースする方法です。鏡像法を用いると、送受信点間の経路が正確に求まるのですが、壁面の数や反射回数が増えると、コンピューターなどを用いて計算する際の手間が爆発的に増大してしまいます。

本稿では、屋内空間の特徴を考慮したちょっとした工夫により、鏡像法にともなう計算量を大幅に削減する手法について紹介します。

2. 鏡像法

電磁波の反射面となりうる壁面（内壁、間仕切り、家

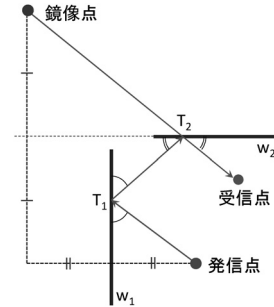


図 1 鏡像法

具の側面など) に 1, 2, ... と番号を付け、 i 番目の壁面を w_i と記します。電磁波は壁で反射するたびに、（その一部が透過するので）強度が減少します。このため通常は反射回数が一定回数（屋内では例えば 10 回程度）を超えて到達する電磁波は無視できるとして、 M 回以内の反射で送信点から受信点に至る経路のみを調べます。以下がその手順です。

手順 1: 反射の回数 n ($1 \leq n \leq M$) を決め、 N 枚の壁面から n 枚を選択する重複順列¹ $(w_{p_1}, \dots, w_{p_n})$ を一つ定める。

手順 2: $w_{p_1} \rightarrow \dots \rightarrow w_{p_n}$ の順番で反射して受信点に到達する経路の鏡像点を計算する。

手順 3: 鏡像点を用いて、上記経路の存在性（と存在する場合の実際の経路）を確認する。

図 1 を用いて、手順 3 の例を示します。壁面の順列として (w_1, w_2) を選ぶと、鏡像点が図のように定まります。鏡像点と受信点を結んだ線分と壁 w_2 との交点 T_2 が、受信点に到達する直前の反射点になります。次いで、 T_2 で反射する前の経路を延ばして得られた壁 w_1 との交点 T_1 が、 T_2 の前の反射点です。 T_1 と発信点を結べば、全体の経路が決まります。

この鏡像法の計算量（計算の際の手間）は経路を探索する壁面の順列の総数で決まります。今、壁面の総数を N とします。連続して同じ壁に反射することはないので、同じ壁面が連続する順列を除外しても、 n 枚の壁面が並ぶ順列の総数は

しおだ しげお
千葉大学 大学院工学研究科
〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33
shioda@faculty.chiba-u.jp

¹ 同じ要素が重複して出現することを許す順列のこと。

$$f(n) = N(N-1)^{n-1}, \quad (1)$$

となります。したがって、反射回数が増えるにともない、計算量が爆発的に増大します。壁面数 N が多いほど、この計算量の増大は深刻です。

3. 計算量の削減方法

壁面が互いに直交する場合、壁面の反射順序に鏡像点は依存しません。例えば、図 1 において、 $w_1 \rightarrow w_2$ の順序で反射する場合の鏡像点と、 $w_2 \rightarrow w_1$ の場合の鏡像点は一致します。しかし、 $w_2 \rightarrow w_1$ の順序で壁面に反射して到達する経路はありません。なぜなら、鏡像点と受信点を結ぶ線分上に壁面 w_1 が存在せず、壁面 w_1 で反射できないからです。一つの鏡像点に対して、もしあったとしても経路は一つしか存在しません。したがって、同じ鏡像点を生成する壁面の順列が複数存在する場合、そのうちどれか一つを選んで鏡像点を生成し、2 節で述べた手順で経路を調べればよいのです。

屋内空間では壁面が互いに水平や垂直に配置されることが多く、同一の鏡像点を生成する反射面の順列が多数存在します。そこで、鏡像点が重複なく網羅的に生成される反射面の順列の集合を選んで、経路探索を行えば、計算の精度を保ちながら大幅な高速化が実現できると期待できます。

このような、反射面の順列の集合を簡単に選ぶ方法は存在するでしょうか。例えば、 w_1, w_2, w_3 の 3 枚の壁面が直交しているとします。このとき、これら 3 枚が隣合う順列に対しては、 w_1, w_2, w_3 の順に並ぶものだけを選べば、鏡像点の重複は避けられます。つまり、直交する複数の壁面が並ぶ場合は壁番号が昇順に並ぶ順列のみを選択すればよいのです。

この考え方をを用いると、2 節の手順 1 において、式 (2) の条件を満たす壁面の順列のみを選択すれば、結果的に鏡像点が重複なく網羅的に生成されることがわかります。

$$p_{i+1} \notin (\mathcal{O}_i^- \cup \{p_i\}) \quad \text{for } i = 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

ここで、 \mathcal{O}_i^- は壁面 w_i と直交する壁面のうち、壁番号が i より小さい壁の番号の集合を表します。式 (2) の条件は以下のように書くこともできます。

$$p_i \notin (\mathcal{O}_{p_{i+1}}^+ \cup \{p_{i+1}\}) \quad \text{for } i = 1, \dots, n-1. \quad (3)$$

ここで、 \mathcal{O}_i^+ は壁面 w_i と直交する壁面のうち、壁番号が i より大きい壁の番号の集合です。

式 (3) を満たす n 枚の壁面が並ぶ順列のうち、最後

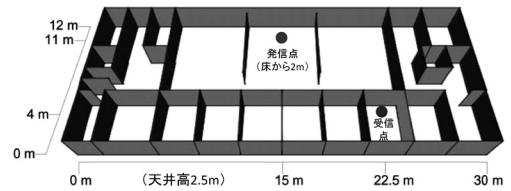


図 2 数値評価対象フロア（受信点は床から 1.8 m の高さ）

表 1 壁面の順列数の比較

M	工夫なし	鏡像点重複回避	比
1	31	31	1
3	28861	8479	0.2938
5	25975861	1274227	0.0491
7	23378275861	167506800	0.0072

が w_i で終わる順列の数を $f_i(n)$ で表すこととすると、 $f_i(n)$ は次の漸化式を満たすことがわかります。

$$f_i(n) = \sum_{k \in \mathcal{O}_i^+, k \neq i} f_k(n-1). \quad (4)$$

例えば、内部に家具などの障害物がない直方体の部屋において、互いに向き合う壁面を w_1 と w_2, w_3 と w_4, w_5 と w_6 とすると、漸化式 (4) から

$$f_1(n) = f_2(n) = 1, \quad f_3(n) = f_4(n) = 2n - 1, \\ f_5(n) = f_6(n) = 2n^2 - 2n + 1,$$

が得られます。したがって、式 (3) を満たし、 n 枚の壁面が並ぶ順列の総数は $\sum_i f_i(n) = 4n^2 + 2$ で与えられます。一方、式 (1) が示すように、鏡像点の重複を回避しない場合、 n 枚の壁面が並ぶ順列の総数は $6 \times 5^{n-1}$ で与えられます。この二つを比較すると、 $n \geq 4$ であり、かつ n が大きくなるほど両者の差が拡がるのが容易に確かめられます。

4. 数値例

細かく壁で仕切られたフロア (図 2) を例にとり、発信点から受信点に至る経路探索を行った壁面の順列数を表 1 に示します。鏡像点の重複回避により経路探索を行う壁面の順列数が削減できること、反射回数上限 M が大きくなるほど削減効果は顕著となることが確認できます。なお、この単純な工夫により、レイトレーシング法で電波伝搬環境を評価する市販のソフトウェアよりも高速に、同種の評価ができることも確認しています。

参考文献

- [1] 日下美穂, 塩田茂雄, “屋内電波伝搬特性解析におけるレイトレーシング法の高速度化,” 信学論, **J98-B**, pp. 654–663, 2015.